

Noble gases as tracers for mixing and gas exchange processes in lakes and oceans

Doctoral Thesis**Author(s):**

Holzner, Christian Peter

Publication date:

2008

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005627458>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Noble gases as tracers for mixing and gas exchange processes in lakes and oceans

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by
CHRISTIAN PETER HOLZNER
Dipl. Umwelt-Natw. ETH
born 14 July 1972
citizen of Tartar (GR)

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Dieter M. Imboden, examiner
Prof. Dr. Bernhard Wehrli, co-examiner
Prof. Dr. Rolf Kipfer, co-examiner

2008

Summary

This work focuses on specific mixing and gas exchange processes that affect the concentrations of dissolved noble gases in lakes and oceans. As a common first-order generalization, the concentrations of noble gases in open waters are expected to correspond to the respective atmospheric equilibrium concentrations. Nevertheless, deviations from gas-exchange equilibrium with the atmosphere – so-called noble gas concentration anomalies – have been detected in various lakes and oceans, e.g. due to the radiogenic production of noble gases or due to the injection of air by breaking waves. The observed magnitudes of the noble gas concentration anomalies allow the rates of the prevailing physical processes to be estimated. Three case studies that use noble gases as tracers to investigate the effects of mixing and gas exchange processes in different water bodies are discussed in this thesis.

- In *Lake Hallwil*, the aeration system that was installed to prevent anoxic conditions in the water has been found to inject noble-gas enriched aeration gas bubbles into the lake. The aeration process results in a characteristic supersaturation of dissolved noble gases in the water body. A noble-gas mass balance suggests that the injected aeration gas is efficiently dissolved in the lake during summer stratification and gas loss to the atmosphere appears to be negligible.
- In the *Black Sea*, high-intensity methane gas seeps influence the concentrations of dissolved noble gases in the water column above the seep sites. Profiles sampled at active seep sites were characteristically depleted in noble gases. Because the noble gas depletions cannot be explained solely by gas exchange with methane gas bubbles rising in the water, a concurrent injection of fluids depleted in noble gases from the active seeps is postulated. The injected fluids seem to undergo vertical transport in the water column due to small density differences and mix with the surrounding water, causing the observed noble-gas depletions. Elevated helium concentrations in the deep water of the Black Sea are due to the release of helium from the solid earth. Analyses of the helium isotope ratios in

water samples as well as in the pore water of sediments suggest that the helium release is spatially heterogeneous and might be related to the methane seepage at certain active seep sites.

- In *Lake Lugano*, two exceptional mixing events triggered considerable vertical water exchange and subsequent gas exchange with the atmosphere. Existing time-series of data on noble gases and other transient tracers, which extend more than ten years back in time, have been prolonged to cover the recent mixing events. The deep water of Lake Lugano was permanently stratified over the last four decades, which resulted in small changes of the dissolved tracer concentrations and a gradual increase of the corresponding apparent water ages in the earlier measurements. During the recent mixing events, however, the tracer concentrations and apparent water ages changed dramatically in response to mixing and gas exchange with the atmosphere. Numerical modeling of the tracer concentrations shows that the deep-water renewal rates increased by at least an order of magnitude during the mixing events.

In conclusion, the presented case studies illustrate that noble gases are very suitable tracers to study gas exchange and mixing processes in lakes and oceans. The tracer data are a useful complement to the standard measurements which are commonly used to characterize the physical conditions in lakes and oceans as they allow secondary gas exchange processes such as the gas exchange with bubbles injected into a water body to be analyzed.

Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit spezifischen Mischungs- und Gasaustauschprozessen, welche die Konzentrationen gelöster Edelgase in Seen und Meeren beeinflussen. Als gebräuchliche Näherung kann angenommen werden, dass die Edelgaskonzentrationen in Oberflächengewässern den jeweiligen atmosphärischen Gleichgewichtskonzentrationen entsprechen. Abweichungen vom Gasaustauschgleichgewicht mit der Atmosphäre – sogenannte Edelgas-Konzentrationsanomalien – wurden aber in verschiedenen Seen und Meeren beobachtet, z.B. aufgrund radiogener Produktion von Edelgasen oder wegen dem Eintrag von Luftblasen durch brechende Wellen. Anhand der Grösse der beobachteten Edelgas-Konzentrationsanomalien lassen sich Raten der vorherrschenden physikalischen Prozesse abschätzen. In dieser Dissertation werden drei Fallstudien behandelt, in welchen Edelgase als Tracer verwendet werden, um die Effekte von Mischungs- und Gasaustauschprozessen in verschiedenen Gewässern zu untersuchen.

- Im *Hallwilersee* werden von der Belüftungsanlage, welche anoxische Bedingungen im Wasser verhindert, Edelgas-angereicherte Gasblasen in den See eingebracht. Der Belüftungsbetrieb führt zu charakteristischen Anreicherungen gelöster Edelgase im Wasserkörper. Eine Massenbilanz der Edelgase deutet darauf hin, dass das eingeblasene Belüftungsgas während der Sommerstratifikation zum grössten Teil im See gelöst wird und dass der direkte Gasverlust in die Atmosphäre vernachlässigbar ist.
- Im *Schwarzen Meer* beeinflussen Gasaustritte am Seegrund, welche mit hoher Intensität Methangas freisetzen, die Konzentrationen gelöster Edelgase in der darüberliegenden Wassersäule. Profile von Wasserproben, die oberhalb solcher Gasaustritte gesammelt wurden, zeigten charakteristische Abreicherungen der Edelgase. Da die vorliegenden Edelgasabreicherungen nicht allein von Gasaustauschprozessen mit den aufsteigenden Methanblasen verursacht sein können, wird spekuliert, dass zusätzlich zur Gasfreisetzung am Seegrund auch Fluide

ausströmen, welche abgereichert sind an Edelgasen. Aufgrund geringer Dichteunterschiede scheinen diese Fluide in der Wassersäule aufzusteigen und sich schliesslich mit dem umgebenden Wasser zu vermischen. Daraus könnten die beobachteten Edelgasanreicherungen resultieren.

Erhöhte Heliumkonzentrationen im Tiefenwasser des Schwarzen Meeres weisen auf die Freisetzung von Helium aus dem Erdinneren hin. Analysen der Heliumisotopenverhältnisse in Wasserproben und auch in Porenwässern von Sedimenten deuten darauf hin, dass die Heliumfreisetzung räumlich heterogen stattfindet und möglicherweise mit dem Ausströmen von Methan aus gewissen aktiven Gasaustritten verknüpft ist.

- Im *Luganersee* führten zwei aussergewöhnliche Mischungsereignisse zu bedeutendem vertikalen Wasseraustausch und erhöhtem Gasaustausch mit der Atmosphäre. Zeitreihen von Edelgaskonzentrationen und anderen transienten Tracern, welche mehr als zehn Jahre zurückreichen, wurden erweitert, um die aktuellen Mischungsereignisse zu erfassen. Das Tiefenwasser des Luganersees war über die letzten vier Jahrzehnte permanent geschichtet, was sich in geringen Veränderungen der gelösten Tracerkonzentrationen und einer allmählichen Zunahme der entsprechenden scheinbaren Wasseralter niederschlug. Im Gegensatz dazu veränderten sich die Tracerkonzentrationen und die scheinbaren Wasseralter während der kürzlichen Mischungsereignisse schlagartig aufgrund der verstärkten Mischung und des Gasaustausches mit der Atmosphäre. Ein numerisches Modell der Tracerkonzentrationen zeigt, dass die Tiefenwassererneuerung während der Mischungsereignisse um mindestens eine Grössenordnung zugenommen hat.

Zusammenfassend lassen die präsentierten Fallstudien den Schluss zu, dass Edelgase sehr geeignet sind als Tracer um Mischungs- und Gasaustauschprozesse in Seen und Meeren zu untersuchen. Die Tracerdaten sind eine sinnvolle Ergänzung der Standardmessungen, die üblicherweise angewendet werden um die physikalischen Bedingungen in Oberflächengewässern zu charakterisieren, weil sie erlauben, Aussagen über sekundäre Gasaustauschprozesse zu machen, welche stattfinden wenn Blasen in einem Gewässer freigesetzt werden.